شبیه‌سازی رفتار سایشی فولاد ٤١٣٠ در مقابل گلوله آلومینایی*

محمدجواد رجبلو(۱) مهدی رفیعی(۲) حسین مستعان(۳)

چکیده

در تحقیق حاضر شبیه سازی فرایند سایش فولاد ٤١٣٠، توسط نرم‌افزار آباکوس انجام شد. از این‌رو فولاد ٤١٣٠ در سه نیروی عمودی ۱، ۳ و ۵ نیوتن به صورت آزمایش پین بر روی دیسک مورد شبیه سازی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد سایش به وجود آمده از نوع خراشان بوده و با افزایش نیروی عمودی بر روی پین، تنش تماسی در منطقه تماس پین و دیسک، عمق و پهنای سایش افزایش می‌یابد. هم‌چنین نتایج به دست آمده از این شبیه‌سازی مطابق با نتایج آزمایشگاهی می‌باشد که دلالت بر قابل اعتماد بودن نتایج شبیه‌سازی در پیش‌بینی شدت سایش دارد.

واژه‌های کلیدی تریبولوژی، نرم‌افزار آباکوس، فولاد ٤١٣٠، آزمایش پین بر روی دیسک، تنش تماسی.

Simulation of Wear Behavior of AISI 4130 Steel Against Al_2O_3 Ball

M. J. Rajabloo M. Rafiei H. Mostaan

Abstract

In this research, the simulation of wear behavior of 4130 steel has been carried out by ABAQUS software. The wear behavior of 4130 steel was simulated at three normal loads of 1, 3 and 5 N under pin-on-disk test. It was found that the predominant wear mechanism was the abrasion and with increasing normal load the contact stress between pin and disk, width and depth of wear track increase during the wear test. Also, it was concluded that the results of simulation, had a good agreement with experimental results that shows the validity of simulation to predict the wear process.

Keywords Surface Tribology, ABAQUS Software, 4130 Steel, Pin-on-Disk Test, Contact Stress.

* نسخهٔ نخست مقاله در تاریخ ۹۵/۳/۱۵ و نسخهٔ پایانی آن در تاریخ ۹۵/۷/۱۰ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) دانش آموخته کارشناسی، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد. ایران.

(۲) نویسنده مسئول، استادیار، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد. ایران.
Email: m.rafiei@pmt.iaun.ac.ir

(۳) استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه اراک. ایران.

DOI: 10.22067/ma.v30i1.56485

مقدمه

سایش کاهش مداوم و نامطلوب ماده از سطوح قطعات درگیر است که در نتیجه حرکت نسبی بین آن‌ها پدید می‌آید. در حالت‌های متعارف، سایش نتیجه تمرکز تنش بیش از حد در بین دو قطعه در حال تماس بوده که به واسطه نیروهای عمودی و مماسی یا اصطکاکی حاصل شده است [۳-1]. سایش و خوردگی مراحل اولیه تخریب‌های سطحی هستند ولی در مراحل بعدی می‌توانند موجب پیدایش اصطکاک، سر و صدا، گرمای ناخواسته و تغییرات ابعادی در قطعات گردند. پدیده‌های مزبور موجب اختلال در کارایی قطعات شده و ممکن است نهایتا به شکست فاجعه آمیز آن‌ها منجر شوند [4-6]. سایش بر خلاف مدول الاستیک و سختی خاصیت ذاتی ماده نیست و بستگی به مولفه‌های تریبوسیستم دارد. بنابراین پدیده سایش را باید در قالب سیستم‌های خاصی تحت عنوان تریبوسیستم‌ها بررسی نمود [7]. سایش خراشان زمانی پدید می‌آید که سطح سخت و زبر در مقابل یک سطح نرم‌تر حرکت لغزشی داشته، در آن فرو رفته و یک سری شیارهایی را به وجود آورد [1]. طبق نتایج به دست آمده از تحقیقات انجام گرفته در زمینه سایش خراشان، شدت و ضعف سایش خراشان بستگی به نسبت سختی ماده ساینده به سختی سطح در حال سایش دارد. تحقیقات نشان می‌دهد سطوحی در مقابل سایش خراشان مقاوم هستند که سختی بیش از نصف سختی ماده ساینده داشته باشند [8,9]. مقاومت مناسب فولاد ٤۱۳۰ در برابر اصطکاک و سایش و همچنین کاربرد آن در صنایع هوایی، شکل‌دهی و پرس، این فولاد را بعنوان گزینه مناسب برای انجام آزمایش‌های سایش معرفی کرده است [10]. هم‌چنین معمولاً از گلوله آلومینایی که پر مصرف‌ترین ساینده مورد استفاده می‌باشد، بعنوان ماده ساینده در مقابل دیسک، در آزمون سایش استفاده می شود. در میان خواص مختلف و برجسته آلومینا می‌توان به خواص مکانیکی مانند استحکام فشاری و سختی بالای آن اشاره نمود [11].

دستگاه‌های سایش پین روی دیسک، پین روی صفحه و پین روی رینگ، ابزار آزمایشگاهی هستند که به منظور ارزیابی مقاومت سایشی و رفتار اصطکاکی مواد و روان کننده‌ها به کار گرفته می شوند و متداول‌ترین روش‌های اندازه‌گیری سایش و اصطکاک به شمار می‌روند. در روش پین روی دیسک معمولا یک پین به صورت نیم کره و یا مفتول به یک بازو متصل بوده و در مقابل یک صفحه دوار به صورت ثابت قرار می‌گیرد و فرایند لغزش آغاز می شود [12,13].

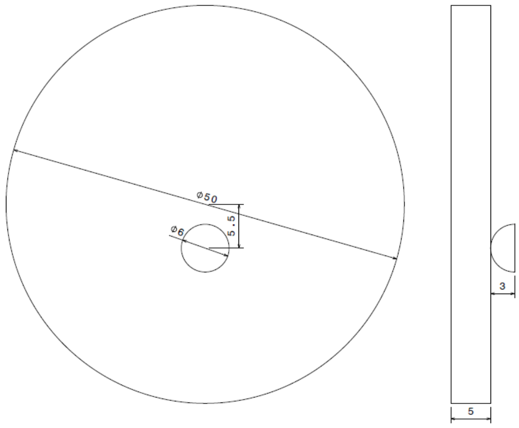
واقعیت آن است که امروزه برای توسعه فناوری‌های فراوری جدید، زمان بسیار کوتاهی در اختیار بوده و منابع در دسترس بسیار محدود می‌باشند. بنابراین لازم است روش‌های سنتی با تکنیک‌های سریع‌تر و اقتصادی‌تر جایگزین شوند. مدل سازی ریاضی و شبیه‌سازی کامپیوتری با در اختیار داشتن توان محاسباتی ارزان و بسته نرم‌افزاری کاربر دوست، این امکان را فراهم می‌سازد [١٤]. در همین راستا سایش را می‌توان توسط مقداری ساده سازی، تعریف و شبیه‌سازی نمود [15]. به طور استاندارد در شبیه سازی فرایند سایش، خوردگی سطح در نظر گرفته نمی‌شود، اگر چه این روند تنها مکانیزم فعال نمی‌باشد [16].

والستروم و همکاران به مقایسه شبیه‌سازی سایش پدهای نیمه فلزی و پدهای ساخته شده از آزبست در مقابل روتور از جنس چدن خاکستری پرداختند که نتیجه کار آن‌ها سایش مطلوب پدهای آزبست در مقابل چدن خاکستری نسبت به پدهای نیمه فلزی را نشان داد [17]. همچنین مطالعه موفقیت‌آمیز هگادکات و همکارانش در مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی آزمون سایش پین کاربید تنگستن روی دیسک فولاد ابزار پوشش داده شده با کربن شبه الماس [18] و شبیه‌سازی سایش خراشان مواد مختلف مانند فولاد کم کربن در مقابل ذرات سخت کاربید سیلیسیوم توسط تورنس [19] با ستفاده از همین

آزمون (پین روی دیسک)، نشان از کارآمدی شبیه‌سازی کامپیوتری می‌باشد.
با توجه به مطالعات مرور شده مشخص شد تحقیقات بسیار اندکی در زمینه شبیه سازی فرایند سایش انجام شده است و همچنین در زمینه شبیه سازی رفتار سایشی فولاد ٤١٣٠ مطالعه ای انجام نشـده اسـت. بنابراین در تحقیق حاضر به بررسی شبیه سازی رفتار سایشی فولاد ٤١٣٠ در برابر گلوله آلومینایی پراداخته شده است.

مواد و روش آزمایش

مراحـل اجرای تحقیق شـــامـل طراحی مـدل Cad، شـبیه‌سـازی با نیروهای مختلف و اعتبارسـنجی آن‌ها تو سط نمونه‌های آزمایشگاهی می‌با شد. دو ا ستاندارد مهم DIN و ASTM، آزمون سـایش و اصـطکاک پین روی دیسک را برای اندازه‌گیری مقدار سایش پیشنهاد داده‌اند [20,21]. استاندارد ASTM دارای مقادیر مناسب از سـایش خطی یا کاهش وزن برای هر دو نوع نمونه قبل و بعد از آزمون می‌باشند. آزمایش پین روی دیسک ا ستاندارد، برای اندازه‌گیری مقدار سایش مورد ا ستفاده قرار می‌گیرد. در روش پین روی دیسک معمولا یک پین به صورت نیم کره و یا مفتول به یک بازو متصل بوده و در مقابل یک صفحه دوار به صورت ثابت قرار می‌گیرد. بازوی نیرو به نحوی طراحی شـده اسـت که نه تنها نیروی اعمالی را تحمل می‌نماید بلکه انحراف آن به علت نیروی ا صطکاک موجود میان پین و صفحه مقابل قابل اندازه‌گیری بوده و با کالیبرا سیون صحیح می‌توان ضـریب اصـطکاک بین آن دو را اندازه‌گیری نمود. بر همین اساس نقشه دیسک و ساچمه رسم و آماده انجام مراحل شـبیه‌سـازی گردید، که در شـکل (۱) مشـاهده می گردد. در این میـان از نرم افزار هرتزین نیز برای محاسبه تنش تماسی بین دو جسم استفاده شد [22].



شکل ۱ موقعیت و ابعاد ساچمه و دیسک (بر حسب میلی‌متر) [۲۳]

نتایج به دست آمده از این نرم‌افزار، شامل مناطق دارای تنش بین دو جسم و مناطق بدون تنش می‌باشند. ورودی برنامه گ ستره نیروی مقاوم سطحی در برابر سایش و مشخصات الاستیک ماده می‌باشد.
در شبیه سازی سایش نمونه‌های مورد نظر از نرم‌افزار آباکوس که از جمله نرم‌افزاری‌های قدرتمند مهندسی به کمک رایانه در زمینه تحلیل به روش اجزاء محدود است، کمک گرفته شد [٢٤].
جنس دیسـک مورد سـایش، فولاد ٤١٣٠ می‌باشـد که مزیت اصلی این فولاد استحکام بسیار زیاد آن است. به دلیل این مزیت می‌توان ورق نازک‌تری انتخاب کرد تا وزن قطعه کاهش یابد، بدون آن که در اسـتحکام قطعه خللی وارد شود. برخی ویژگی‌های این فولاد در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱ برخی از خواص فیزیکی و مکانیکی فولاد ٤١٣٠ [25]

خواص مکانیکی و فیزیکی	مقدار
مدول یانگ	۲۰۵ GPa
استحکام کششی نهایی	٦٧٠ MPa
نسبت پواسون	۰/۲۹
چگالی	۷/۸ gr/cm^3

گلوله مورد استفاده در آزمایش پین بر روی دیسک نیز از جنس اکسید آلومینیوم یا آلومینا بود که یکی از مواد سرامیکی مهم است و دارای کاربردهای متنوعی در زمینه‌های مختلف می‌باشد. در جدول (۲) به برخی از خواص فیزیکی و مکانیکی آلومینا اشاره شده است.

جدول ۲ برخی از خواص فیزیکی و مکانیکی گلوله آلومینایی [11]

خواص مکانیکی و فیزیکی	مقدار
مدول یانگ	۳۵۰ GPa
استحکام کششی نهایی	۳۰۰ MPa
نسبت پواسون	۰/۲۱
چگالی	۳/۹ gr/cm^3

روش مورد استفاده در اعتبار سنجی این تحقیق، بازبینی تجربی می‌باشد که عبارت است از مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی و آزمایشگاهی به دست آمده، که این روش مهم‌ترین روش اعتبار سنجی یک مدل شبیه‌سازی است [26-28]. لازم به ذکر است نتایج حاصل از شبیه سازی با تحقیق یکی از نویسندگان این مقاله مقایسه شد که جزئیات مربوط به آزمون های تجربی در مرجع [۲۳] ذکر شده است و در اینجا از ذکر آن صرفنظر شد.

نتایج و بحث

شبیه‌سازی سایش

با استفاده از مشاهده تغییرات نیرو در کانتورهای سایش، شبیه سازی با سه نیروی ۱، ۳ و ۵ نیوتن انجام شد. با توجه به نرم‌افزار هرتزین، مقدار تنش تماسی بین ساچمه و دیسک برای این نیروها به ترتیب ۷٤۵، ۱۰۷۵ و ۱۲۷۵ مگاپاسکال محاسبه شد. با افزایش نیروی عمودی وارد بر ساچمه مقدار تنش تماسی نیز افزایش پیدا می‌کند. تنش تماسی به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها در دیسک به ترتیب در شکل‌های (۲) الی (٤) ارائه شده است. همین طور این تنش در شکل (۵) برای ساچمه آورده شده است.

کانتورهای شکل‌های (۲) الی (٤) با توجه به استحکام نهایی تعریف شده در نرم‌افزار، برای فولاد ٤۱۳۰، ٦۷۰ مگاپاسکال می‌باشد. یعنی دیسک با جنس فولاد ٤۱۳۰ پس از گذشتن از این مقدار تنش، دچار تغییر شکل پلاستیک و سایش می‌شود.

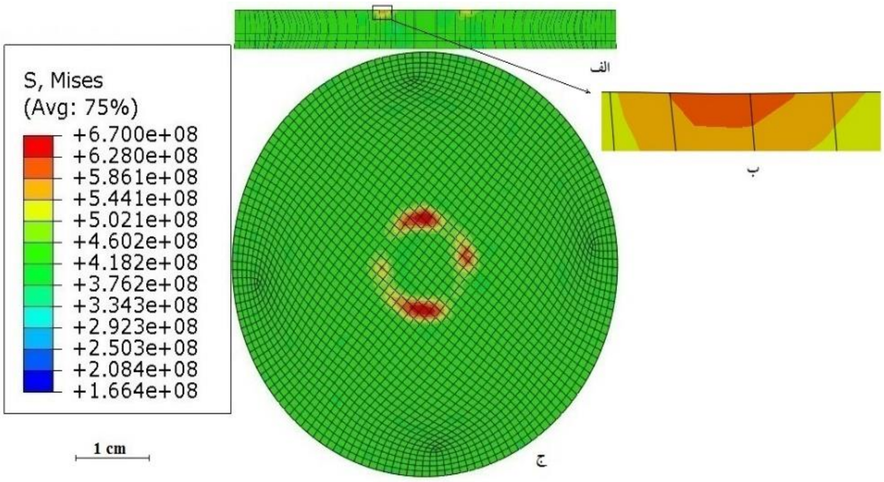
با توجه به این موضوع می‌توان به راحتی مشاهده کرد که تغییر شکل پلاستیک و سایش در هر سه دیسک ایجاد شده است (شکل‌های ۲ الی ٤)، با این تفاوت که محدوده تغییر شکل پلاستیک، با افزایش نیروی عمودی وارد شده بر ساچمه افزایش پیدا می‌کند. این مطلب موید مقادیر تنش تماسی به دست آمده از نرم‌افزار هرتزین نیز می‌باشد. در هر سه نمونه شبیه‌سازی شده، تنش تماسی بیش از مقدار استحکام نهایی فولاد می‌باشد، به این ترتیب مقدار تغییر شکل پلاستیک و سایش با افزایش مقدار نیروی عمودی بر ساچمه افزایش می‌یابد. در این شکل‌ها دیده می‌شود که محدوده تغییر شکل پلاستیک، هم از نظر پهنا و هم از نظر عمق افزایش پیدا می‌کند.

در نیروی ۱ نیوتن عمق نفوذ (شکل ۲- الف) و مقدار بحرانی تنش تماسی یا محدوده تغییر شکل پلاستیک بسیار کم بوده و به سختی مشاهده می‌شود، و این تغییرات در سطح (شکل ۲- ج) نیز به صورت جزئی می‌باشد. با افزایش نیروی عمودی به ۳ نیوتن هم عمق و هم پهنای منطقه تحت تنش بالا (ناحیه قرمز رنگ) افزایش می‌یابد. این افزایش به طور متوسط به مقدار ۰/۵ میلی‌متر در عمق و ۲ میلی‌متر در پهنا می‌باشد. رفتار افزایشی مقدار بحرانی تنش تماسی یا محدوده تغییر شکل پلاستیک در نیروی ۵ نیوتن نیز دیده می‌شود (شکل ٤). در این نیرو عمق و پهنای منطقه تحت تنش بالا (ناحیه قرمز رنگ) به ترتیب ۰/۷۵ و ۲/۵ میلی‌متر می‌باشد.

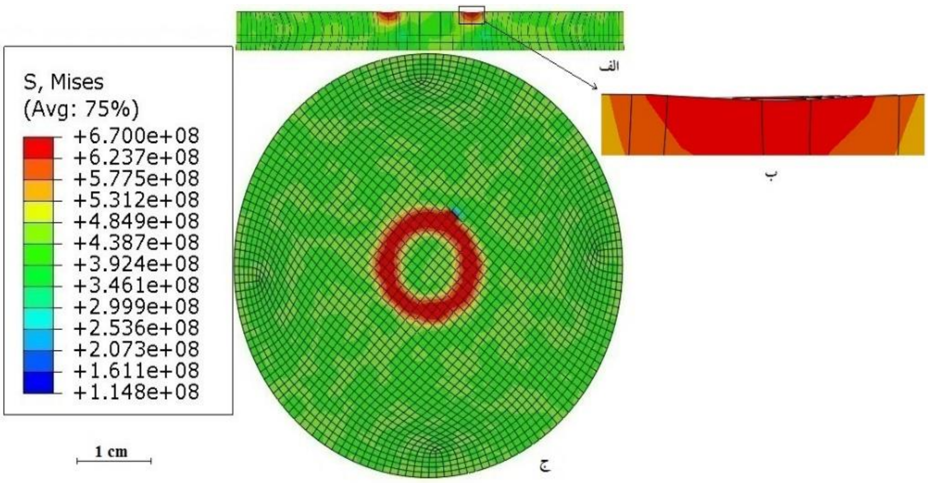
کانتورهای مربوط به تنش تماسی گلوله نشان داده شده در شکل (۵) مربوط به لحظه اولیه پردازش شبیه سازی می‌باشد. علت این کار را می‌توان در شکل (۲- ج) جستجو کرد. در شکل (۲- ج) نمونه با نیروی

عمودی ۱ نیوتن مشاهده می‌شود. مسیر حرکت ساچمه مانند دو نمونه دیگر (۳ و ۵ نیوتن) به صورت کاملا دایره‌ای است و به حداکثر تنش یعنی ۶۷۰ مگاپاسکال نرسیده است و فقط نقاط خاصی از سطح دیسک این مقدار را شامل می‌شود.

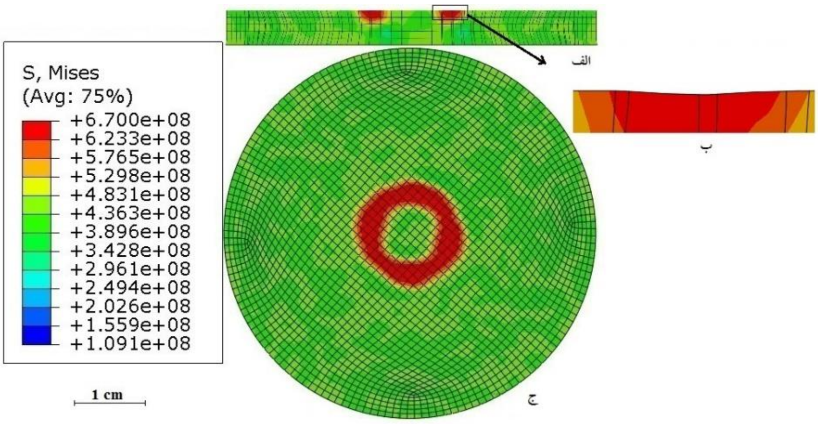
این پدیده باعث سائیده شدن یا تغییر شکل پلاستیک بیشتر مناطقی از مسیر حرکت ساچمه نسبت به مناطق دیگر می‌شود و عامل حرکت ساچمه در راستای بار اعمالی بر روی ساچمه یا بالا و پایین شدن آن می‌شود. این عامل نیز باعث کم و زیاد شدن مقدار تنش تماسی در کانتورها می‌باشد.



شکل ۲ مناطق توزیع تنش در دیسک تحت تاثیر نیروی عمودی ۱ نیوتن، الف) تصویر برش خورده دیسک از وسط، دید از روبرو، ب) تصویر برش خورده منطقه تغییر شکل پلاستیک یافته از وسط، دید از روبرو، ج) تصویر دیسک از بالا



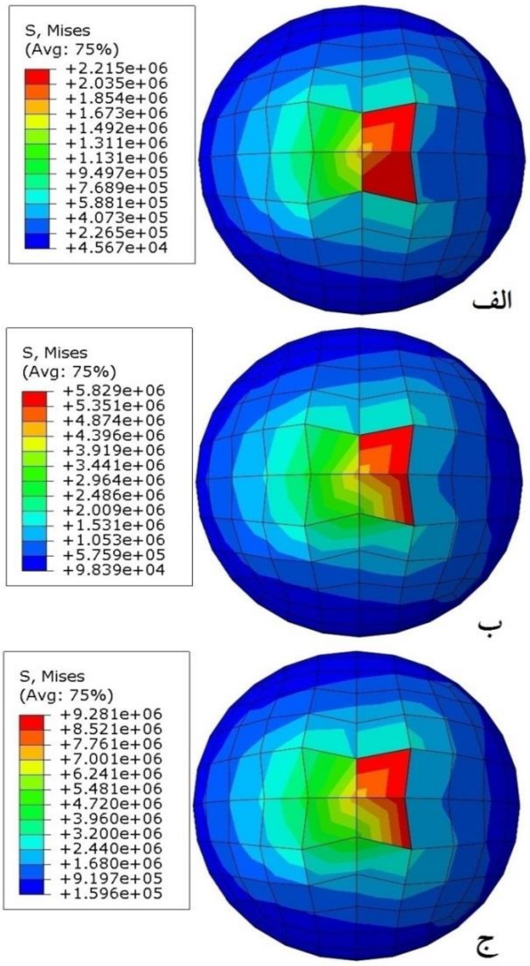
شکل ۳ مناطق توزیع تنش در دیسک تحت تاثیر نیروی عمودی ۳ نیوتن، الف) تصویر برش خورده دیسک از وسط، دید از روبرو، ب) تصویر برش خورده منطقه تغییر شکل پلاستیک یافته از وسط، دید از روبرو، ج) تصویر دیسک از بالا



شکل ٤ مناطق توزیع تنش در دیسک تحت تاثیر نیروی عمودی ٥ نیوتن، الف) تصویر برش خورده دیسک از وسط، دید از روبرو، ب) تصویر برش خورده منطقه تغییر شکل پلاستیک یافته از وسط، دید از روبرو، ج) تصویر دیسک از بالا

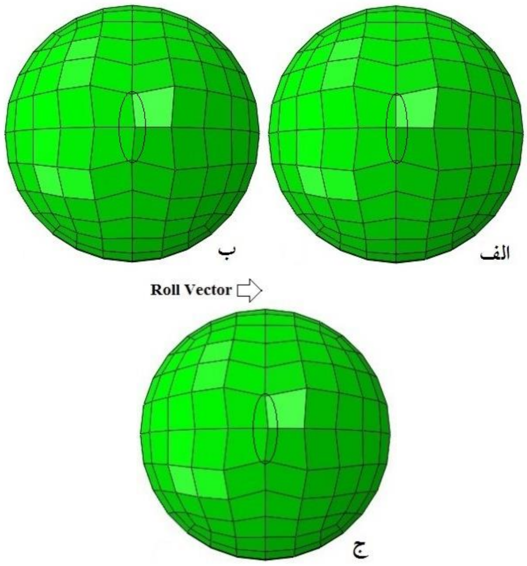
در همین راستا علت بالا و پایین شدن ساچمه مربوط به شرایط مرزی به کار گرفته شده در نرم‌افزار می‌باشد. به این صورت که ساچمه قبل از حرکت دیسک، بر روی آن قرار گرفته و تا رسیدن دیسک به حداکثر سرعت دورانی (٥ سانتیمتر بر ثانیه) مدت زمان کوتاهی را (۰/۱۲ ثانیه) به صورت متمرکز در ناحیه شروع عملیات سایش، قرار می‌گیرد. به همین جهت مقدار نیروی اعمال شده از سمت ساچمه در نقطه شروع عملیات سایش و چند سانتیمتر بعد از آن دچار تنش تماسی بیشتری نسبت به نقاط دیگر می شود. این امر در مقدار سایش این ناحیه تاثیر گذار بوده و باعث ایجاد فرورفتگی بیشتر این ناحیه می شود. با ادامه عملیات شبیه سازی و درگیر شدن بیشتر ساچمه با این ناحیه، مقدار تغییر شکل پلاستیک نیز در این ناحیه نسبت به نواحی دیگر افزایش می‌یابد که عامل مناسبی برای به حرکت در آوردن ساچمه در راستای نیروی اعمالی بر روی ساچمه می‌باشد.

در شکل (٥) مانند شکل‌های (۲) الی (٤) روند افزایشی مقدار تنش تماسی بر روی گلوله با افزایش نیروی عمودی روی گلوله از ۱ به ٥ نیوتن نیز دیده می‌شود، که این روند مانند تنش‌های تماسی به دست آمده توسط نرم‌افزار هرتزین می‌باشد.



شکل ٥ مناطق توزیع تنش در گلوله آلومینایی، الف) ۱ نیوتن، ب) ۳ نیوتن، ج) ٥ نیوتن

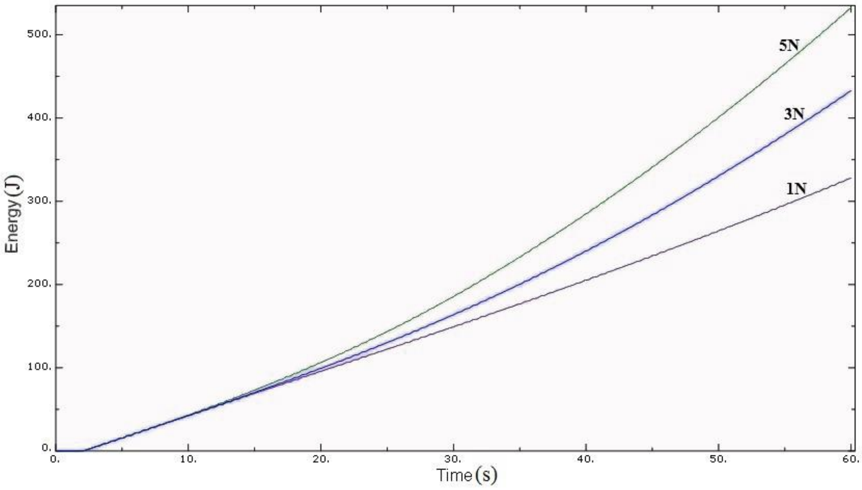
به علت بیشتر بودن مدول الاستیک گلوله آلومینایی (۳۵۰ گیگاپاسکال) نسبت به دیسک فولادی (۲۰۵ گیگاپاسکال) حد پلاستیک گلوله نسبت به دیسک باریک‌تر است و از طرف دیگر استحکام نهایی گلوله (۳۰۰ مگاپاسکال) کمتر از نصف مقدار استحکام نهایی فولاد ٤١٣٠ (٦٧٠ مگاپاسکال) می‌باشد. با توجه به این موضوع و ناچیز بودن منطقه پلاستیک در ساچمه نتیجه می‌شود که به دلیل متمرکز بودن تنش تماسی در نوک گلوله که منطقه بسیار کوچکی می‌باشد (شکل ٥)، تغییر شکل پلاستیک در آن به راحتی قابل دیدن می‌باشد (شکل ٦)، ولی تغییر شکل پلاستیک در دیسک به علت گستردگی منطقه تحت تاثیر تنش تماسی (مسیر دایره‌ای با قطر بیش از ۱ سانتیمتر، نشان داده شده در شکل‌های (۲) الی (٤)) به راحتی دیده نمی‌شود. شکل (٦) منطقه تغییر شکل داده شده گلوله آلومینایی در سه نیروی ۱ نیوتن، ۳ نیوتن و ۵ نیوتن را نشان می‌دهد (نشان داده شده توسط اشکال بیضی‌گون در نوک گلوله). این تغییر شکل به صورتی است که در گلوله با نیروی عمودی ۱ نیوتن تغییر شکل رخ نداده ولی در نمونه‌ها با بار عمودی ۳ و ۵ نیوتن مقدار کمی تغییر شکل پلاستیک در نوک گلوله دیده می‌شود.



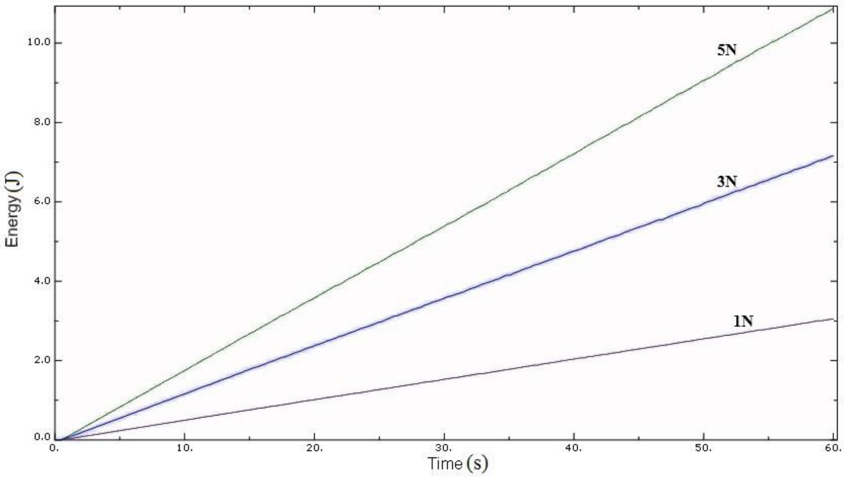
شکل ٦ منطقه تحت تاثیر تنش یا تغییر شکل پلاستیک یافته در نوک ساچمه، الف) ۱ نیوتن، ب) ۳ نیوتن، ج) ۵ نیوتن

با توجه به شکل‌های ارائه شده در قبل (شکل‌های ۲ الی ٦) بدیهی است که با افزایش نیروی عمودی بر روی ساچمه تغییر شکل پلاستیک در نقطه اثر نیرو چه در دیسک و چه در ساچمه افزایش می‌یابد. نمودارهای ارائه شده در شکل‌های (۷) الی (۹) مربوط به مقدار انرژی تلف شده در سه نمونه شبیه‌سازی شده می‌باشد. این نمودارها نشان دهنده این هستند که با افزایش بار عمودی اعمال شده بر روی گلوله مقدار سایش افزایش یافته و در نتیجه میزان تغییر شکل پلاستیک، اصطکاک و چسبندگی گلوله به دیسک افزایش می‌یابد، که این پدیده عامل صرف انرژی بیشتر می‌باشد. حداقل و حداکثر اتلاف انرژی نیز به ترتیب مربوط به نمونه‌ها با بار عمودی ۱ و ۵ نیوتن می‌باشد.

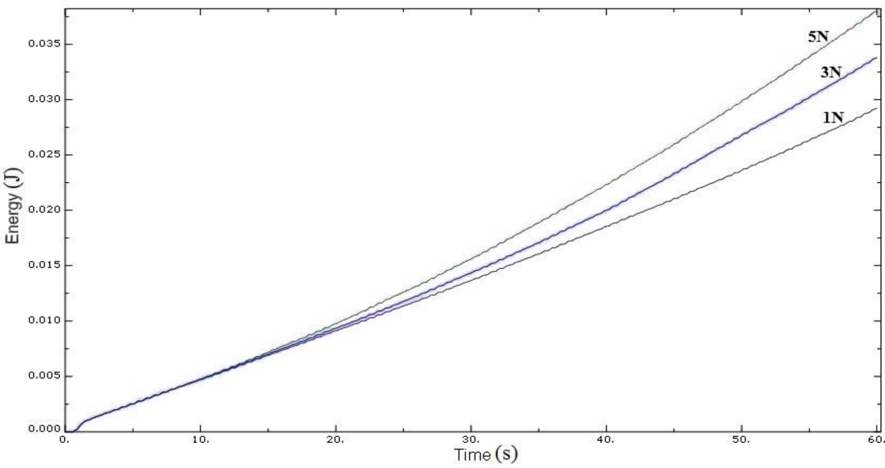
به طور عمومی انرژی وارد شده به ماده در سایش، صرف اصطکاک، چسبندگی، تغییر شکل پلاستیک و سایش می‌شود. در سه مورد اول یعنی اصطکاک، چسبندگی و تغییر شکل پلاستیک، انرژی به صورت گرما و افزایش دمای گلوله و دیسک تلف می‌شود ولی در مورد گزینه چهارم یعنی سایش که در شکل‌های (۲) الی (٤)، مشاهده شد، انرژی صرف افزایش وسعت منطقه تحت تنش حداکثر می‌شود و این نشان دهنده این موضوع است که مقدار قابل ملاحظه‌ای از انرژی مصرف شده در این نمونه‌ها صرف افزایش دمای منطقه تحت سایش می‌شود. همان‌طور که در شکل‌های (۷) الی (۹) مشاهده می‌شود مقدار انرژی تلف شده در حین فرایند سایش در اثر تغییر شکل پلاستیکی ایجاد شده، نسبت به دو مولفه دیگر، یعنی اصطکاک و چسبندگی بسیار بیشتر است. زیرا در اثر لغزش یک جسم سخت (گلوله آلومینایی) بر روی یک سطح نسبتا نرم، تغییر شکل پلاستیکی شدیدی اتفاق می‌افتد که موجب اتلاف انرژی بیشتر می‌شود (شکل ۱۱).



شکل ۷ نمودار اتلاف انرژی توسط تغییر شکل پلاستیک



شکل ۸ نمودار اتلاف انرژی توسط اصطکاک

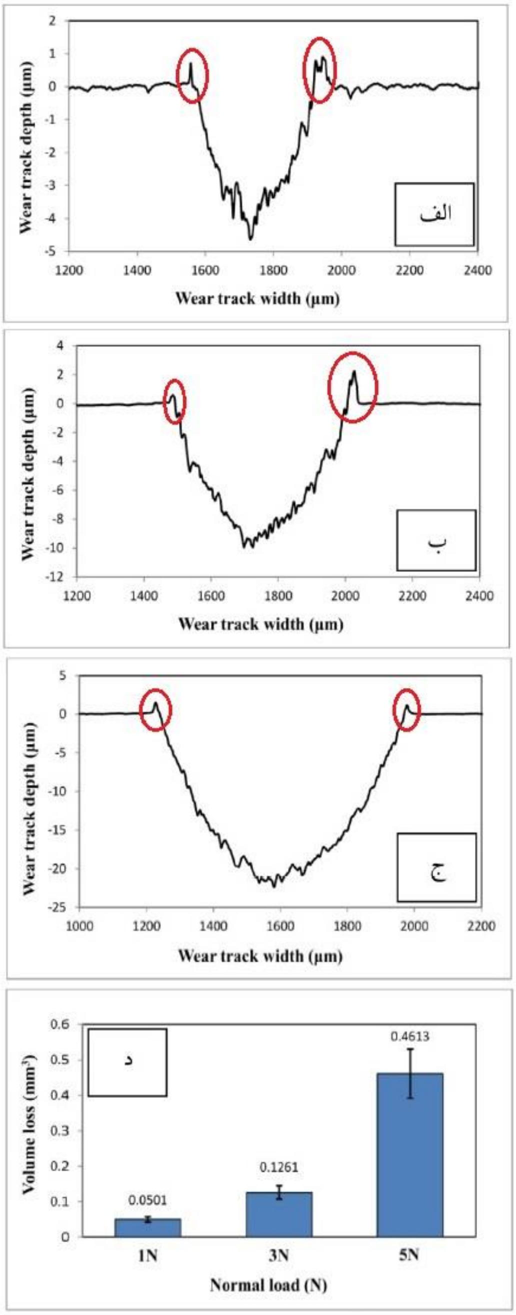


شکل ۹ نمودار اتلاف انرژی توسط چسبندگی ساچمه به دیسک

اتلاف انرژی ناشی از چسبندگی بسیار ناچیز است زیرا سطح تماس حقیقی میان دو ماده تحت سایش به دلیل وجود ناهمواری‌های سطحی کم است و از طرفی ساختار کریستالی دو ماده با هم متفاوت است که این باعث کاهش مقدار چسبندگی می‌شود. با توجه به این مطالب می‌توان گفت نتایج حاصل از شبیه‌سازی توجیه کننده مکانیزم سایش خراشان از نوع خیش‌ریز می‌باشد.

نتایج آزمایشگاهی

نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در این بخش از کار یکی از محققین حاضر در تحقیق قبلی [۲۳] به‌دست آمده است. شکل (۱۰) منحنی‌های پروفیل تماسی سطح سایش را به همراه نمودارهای ستونی کاهش حجم ناشی از آزمون سایش نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش بار عمودی از ۱ نیوتن به ۵ نیوتن پهنا و عمق سایش افزایش می‌یابد. در واقع این امر نشان دهنده افزایش میزان سایش با افزایش بار عمودی اعمال شده روی سطح نمونه درحین آزمون سایش می‌باشد. افزایش میزان بار عمودی باعث افزایش تنش تماسی در نقطه تماس گلوله آلومینایی با سطح ماده شده که منجر به تشدید سایش و کاهش حجم ماده می‌شود. از طرفی افزایش نرخ سایش با افزایش بار عمودی به این علت است که حرارت اصطکاکی ایجاد شده در سطح تماس با افزایش بار عمودی، افزایش یافته و در نتیجه استحکام ماده کاهش می‌یابد، ماده نرم‌تر شده و فرایند خیش‌زنی بیشتر در سطح سایش اتفاق می‌افتد. وجود برآمدگی در ابتدای و انتهای اثر سایش نشان دهنده وقوع تغییر شکل پلاستیک و انتقال جرم از شیار سایش به سمت لبه‌های اثر سایش می‌باشد. همچنین وجود ناهمواری در سطح سایش که در نمودارها کاملا مشخص است بیان‌گر ایجاد شیارهای سایشی کوچک در سطح سایش در اثر وقوع فرایند سایش توسط لغزش گلوله آلومینایی روی سطح می‌باشد [1]. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی موجود در شکل ۱۱ (ب، ج و د) این موضوع را تایید می کند. با استفاده از منحنی‌های پروفیل تماسی سطح نشان داده شده، نمودارهای ستونی کاهش حجم بر حسب بار عمودی برای فولاد ۴۱۳۰ ترسیم شدند (شکل ۱۰- د).



شکل ۱۰ منحنی‌های پروفیل تماسی از سطح سایش در بارهای الف) ۱ نیوتن، ب) ۳ نیوتن، ج) ۵ نیوتن و د) نمودارهای ستونی میزان سایش بر حسب بار عمودی [۲۳]

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش بار عمودی، میزان سایش فولاد ۴۱۳۰ افزایش می‌یابد [۲۳]. چادهاری و همکارانش [29] اثر سرعت لغزش و بار عمودی را روی اصطکاک و سایش آلومینیوم مورد بررسی قرار دادند. این محققین گزارش دادند که با افزایش بار عمودی نرخ سایش در آلومینیوم به علت افزایش دما و در نتیجه تغییر شکل پلاستیک بیشتر و همچنین افزایش اصطکاک، افزایش می‌یابد. همچنین گزارش شده است که با افزایش میزان بار عمودی، تنش تماسی و حرارت در حین سایش افزایش می‌یابد که منجر به تغییر شکل پلاستیکی ناهمگونی‌های سطحی شده و این موضوع سطح تماس حقیقی دو سطح را افزایش می دهد.

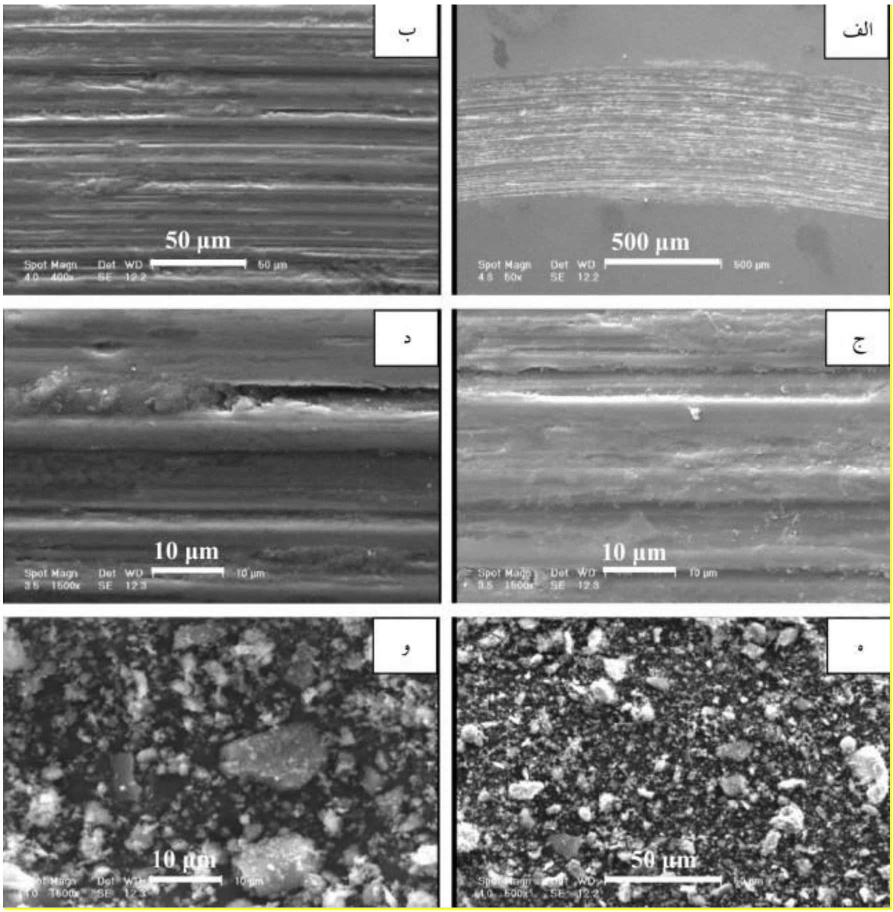
محققین دیگر نیز به اثر افزایش بار عمودی در حین آزمون سایش و وقوع تغییر شکل پلاستیکی بیشتر و در نتیجه میزان سایش بیشتر اشاره کرده‌اند [30].

شکل (۱۱) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) سطح سایش فولاد ۴۱۳۰ را تحت بار ۳ نیوتن نشان می‌دهد. وجود شیارهایی به موازات هم در تصویر سطح سایش بیان‌گر وقوع سایش خراشان می‌باشد. در واقع می‌توان گفت در این نمونه مکانیزم غالب، سایش خراشان می‌باشد. در این آزمون سایش به دلیل لغزش یک جسم سخت (گلوله آلومینایی با سختی ۲۶۰۰ ویکرز) روی سطح نرم‌تر فولاد ۴۱۳۰ (با سختی ۲۰±۱۶۵ ویکرز)، وقوع تغییر شکل پلاستیک و شخم زنی سطح چندان دور از انتظار نیست. وجود برآمدگی‌ها در اطراف اثر سایش (شکل ۱۰) بیانگر فعال بودن مکانیزم سایش خیش‌ریز می‌باشد [۲۳].

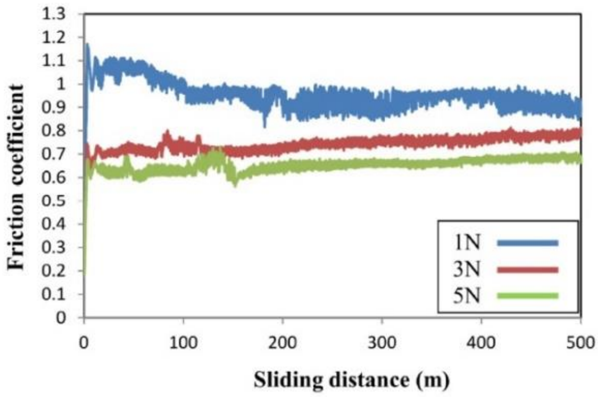
شکل (۱۲) نمودارهای ضریب اصطکاک برای آزمون سایش فولاد ۴۱۳۰ در مقابل گلوله آلومینایی را در بارهای مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش بار عمودی در آزمون سایش ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد.

مکانیزم‌های پایه‌ای اصطکاک لغزشی شامل دو مولفه اصلی چسبان و تغییر شکل هستند. نزدیک شدن ناهمگونی‌های سطحی به هم باعث ایجاد تماس‌های چسبان توسط برهم کنش‌های فیزیکی و شیمیایی می‌شود. هم‌چنین تغییر شکل پلاستیکی ناهمگونی‌های سطحی (تغییر شکل میکروسکوپی) و عمل خیش‌زنی توسط سطح سخت و ایجاد شیار در سطح نرم‌تر (تغییر شکل ماکروسکوپی) باعث ایجاد اصطکاک می‌شوند. در مورد جفت سایشی سرامیک- فلز با ذرات سایشی به دام افتاده بین دو سطح سایشی، مولفه تغییر شکل یعنی نیروی مورد نیاز برای خیش‌زنی و ایجاد شیار در مقایسه با مولفه چسبان غالب است و بنابراین مکانیزم عمده اصطکاک، تغییر شکل پلاستیکی است [31]. به همین دلیل با صاف شدن سطح قطعات در بارهای بالاتر چون کاهش قابل ملاحظه‌ای در رفتار خیش‌زنی و تغییر شکل پلاستیک ناهمگونی‌ها رخ می‌دهد، ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد.

از طرف دیگر همان‌طور که قبلا اشاره شد با افزایش بار عمودی میزان حرارت اصطکاکی در سطح تماس افزایش یافته و باعث کاهش استحکام ماده و افزایش سایش می‌شود. این افزایش دمای فصل مشترکی باعث تشکیل لایه‌های اکسیدی با استحکام برشی کم شده (لایه تریبوشیمی)، دو سطح را از یکدیگر جدا کرده و هم‌چنین به علت انعطاف‌پذیری کم باعث کاهش میزان اصطکاک می‌شود. گزارش شده است که در یک تماس لغزشی از آن‌جایی که با افزایش میزان بار عمودی اکسیداسیون سطوح فلزی اتفاق می‌افتد ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد [32]. هم‌چنین مشخص شده است که در بارهای بیشتر ضریب اصطکاک کامپوزیت‌های زمینه نیکل به علت حرارت اصطکاکی بیشتر کاهش می‌یابد [33].



شکل ۱۱ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از (الف) تا (د) سطح سایش و (ه) و (و) ذرات سایشی فولاد ٤١٣٠ تحت بار ۳ نیوتن و در دمای محیط [۲۳].



شکل ۱۲ نمودارهای ضریب اصطکاک بر حسب مسافت لغزشی برای فولاد ٤١٣٠ تحت بارهای مختلف و در دمای محیط [۲۳]

مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی

نتایج شبیه سازی به دست آمده در این تحقیق با نتایج تجربی و آزمایشگاهی به دست آمده توسط یکی از این محققین در تحقیق قبلی [۲۳] جهت تایید صحت شبیه سازی مقایسه شد.

از مقایسه نتایج شبیه‌سازی (شکل‌های ۲ الی ٤) و منحنی‌های پروفیل تماسی از سطح سایش (شکل ۱۰) به روشنی می‌توان مشاهده کرد که افزایش بار عمودی در

عمق و پهنای سایش موثر بوده و نتایج شبیه‌سازی مطابق با نتایج تجربی می‌باشد. به عنوان مثال در شکل (۱۰–الف) مربوط به نمونه با بار عمودی ۱ نیوتن عمق و پهنای سایش به ترتیب ٤/۵ و ۳۸۰ میکرومتر می‌باشد و این مقادیر در نمونه با بار عمودی ۵ نیوتن (۱۰– ج) به ۲۲/۵ و ۷٤۰ میکرومتر افزایش پیدا می‌کند [۲۳]. این روند افزایشی در مقدار عمق و پهنای سایش در نمونه‌های شبیه‌سازی شده نیز دیده می‌شود. در نمونه با نیروی عمودی ۱ نیوتن (شکل ۲) محدوده تغییر شکل پلاستیک بسیار کم می‌باشد که با افزایش نیروی عمودی به ۵ نیوتن، (شکل ٤) عمق و پهنای محاسبه شده از طریق شبیه‌سازی ناحیه متاثر از تغییر شکل پلاستیک، به ترتیب به ۱ و ۲/۵ میلیمتر افزایش می‌یابد.

با توجه به مدول الاستیک بالای گلوله نسبت به دیسک، تغییر شکل پلاستیک و منطقه ساییده شده در دیسک محدود می‌باشد.

نکته قابل توجه که در نمودارهای اصطکاک نمونه‌های شبیه‌سازی شده (شکل ۸) و نمونه‌های تجربی (شکل ۱۲) دیده می‌شود، رفتار معکوس آن‌ها با افزایش بار عمودی است. به این صورت که در نمونه‌های تجربی، نمونه با بار عمودی ۱ نیوتن و در نمونه‌های شبیه‌سازی شده، نمونه با بار عمودی ۵ نیوتن دارای حداکثر اصطکاک هستند. به همین ترتیب نمونه با بار عمودی ۵ نیوتن در نمونه‌های تجربی و نمونه با بار عمودی ۱ نیوتن در نمونه‌های شبیه‌سازی شده حداقل اصطکاک را دارا می‌باشند.

همان‌طور که در تحلیل نمونه‌های شبیه‌سازی شده و تجربی گفته شد این رفتار معکوس در میزان اصطکاک به حرارت ایجاد شده در نمونه‌ها و محصولات به وجود آمده بر اثر این حرارت می‌باشد. شبیه‌سازی نمونه‌ها کاملا ساده و توسط پیش‌فرض‌های نرم‌افزار انجام گرفته است و شرط ایجاد لایه‌های اکسیدی با توجه به حرارت به وجود آمده توسط اصطکاک در آن قید نشده است. به این معنی که عملیات کد نویسی برای شبیه‌سازی نمونه‌ها انجام نگرفته است. به همین علت با افزایش نیروی عمودی، مقدار اصطکاک نیز افزایش می‌یابد. این در حالی است که در نمونه‌های تجربی با افزایش بار عمودی میزان حرارت اصطکاکی در سطح تماس افزایش یافته و باعث کاهش استحکام ماده و افزایش سایش می‌شود. این افزایش دمای فصل مشترکی باعث تشکیل لایه‌های اکسیدی با استحکام برشی کم شده (لایه تریبوشیمی)، دو سطح را از یکدیگر جدا کرده و هم‌چنین به علت انعطاف‌پذیری کم باعث کاهش میزان اصطکاک می‌شود.

نتیجه‌گیری

۱. با افزایش نیروی عمودی، مقدار تنش تماسی بر اثر سایش افزایش می‌یابد.
۲. در هر سه نمونه شبیه‌سازی شده تنش تماسی بیش از مقدار استحکام نهایی فولاد می‌باشد، به این ترتیب مقدار تغییر شکل پلاستیک و سایش با افزایش مقدار نیروی عمودی بر ساچمه افزایش می‌یابد.
۳. نتایج حاصل از شبیه‌سازی توجیه کننده مکانیزم سایش خراشان از نوع خیش‌ریز بود.
٤. با افزایش بار عمودی اعمال شده بر روی ساچمه مقدار سایش افزایش یافته و در نتیجه میزان تغییر شکل پلاستیک، اصطکاک و چسبندگی ساچمه به دیسک افزایش می‌یابد.
۵. از مقایسه نتایج شبیه‌سازی و منحنی‌های پروفیل تماسی از سطح سایش در آزمایش تجربی به روشنی می‌توان دریافت که افزایش بار عمودی در عمق و پهنای سایش موثر می‌باشد.
٦. با توجه به عدم استفاده از عملیات کد نویسی، اتلاف انرژی ناشی از تغییر شکل پلاستیک بیشترین مقدار و اتلاف انرژی ناشی از چسبندگی کمترین مقدار می‌باشد که این موضوع نشان دهنده وقوع مکانیزم سایش خراشان می‌باشد.

مراجع

1. Rabinowicz E., "Friction and Wear of Materials", New York, John Wiley and Sons, (1965).
2. Williams J.A., "Wear and wear particles - Some fundamentals, Tribology International", Vol. 38(10) pp. 863-870, (2005).

۳. محمدی خواه م.، ثابت ح.، شکوه فر ع.، محرابیان س.، هادی زاده ا.، "بررسی و مقایسه ریزساختار، سختی و مقاومت به سایش لایه‌های سخت کامپوزیتی ایجاد شده به روش جوشکاری FCAW حاوی ذرات TiC و TiCN بر روی فولاد ساده کربنی"، *فصلنامه علمی پژوهشی فرایندهای نوین در مهندسی مواد*، سال چهارم، شماره اول، بهار (۱۳۸۹).

4. Stephen M., Hsu S., Shen M., "Wear Maps", Modern Tribology Handbook, (2001).

۵. رضاقلی زاده م.، حیدری ا.، بینا م.ح.، ساعتچی ا.، "تاثیر عملیات حرارتی و توزیع ذرات کاربیدبور بر مقاومت به خوردگی و سایش پوشش الکترولس دولایه $Ni-P/Ni-B-B_4C$"، *فصلنامه علمی پژوهشی فرایندهای نوین در مهندسی مواد*، سال نهم، شماره سوم، پاییز (۱۳۹٤).

6. Aghakhani M., Shafyei A., Monajatizade H., Aghakhani M.A., "Effect of Deposition Regime on Tribological Behavior of VK8 Coating on 1.2344 Tool Steel Obtained by Electro Spark Method", *Journal of Advanced Materials and Processing*, Vol. 1, pp. 21-27, (2013).
7. Hamzaban M.T., Rostami J. , Memarian H., "Study of rock-pin interaction in cerchar abrasivity test", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 72, pp. 100-108, (2014).
8. Stachowiak G., "Wear – Materials, Mechanisms and Practice", John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, (2006).
9. Mezlini S., Zidi M., Arfa H., Ben Tkaya M., Kapsa P., "Experimental, numerical and analytical studies of abrasive wear: correlation between wear mechanisms and friction coefficient", Presented by Évariste Sanchez-Palencia, (2005).
10. Bultel H, Vogt J.B, "Influence of heat treatment on fatigue behaviour of 4130 AISI steel", *Procedia Engineering*, Vol. 2, pp. 917-924, (2010).
11. Cannon R.M, "Mechanical properties of Mgo and Al_2O_3, Proceeding of an international symposium and properties of Mgo and AlO ceramics", MIT, Massachusetts, June 13-16, Columbus: The American Ceramic Society, pp, 818-838 (1983).
12. Ashrafizadeh F., Salehi M., "Surface Metallurgy and Tribology", *Iranian Society of Surface Science & Technology* (in Persian), (1995).
13. Satoh Y., Iwafuchi K., "Effect of rail grinding on rolling contact fatigue in railway rail used in conventional line in Japan", *Wear*, Vol. 265, pp. 1342-1348, (2008).

۱٤. کرمانپور ا.، "اصول و کاربرد شبیه‌سازی فرایند"، جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، (۱۳۹۰).

15. Anderson S., "Wear simulation", Royal Institute of Technology (KTH), Stokholm, Sweden, (2010).
16. Meng H.C., "Wear modeling: Evaluation and categorization of wear", Dissertation, University of Michigan, (1994).

17. Wahlstroam J., Sderberg A., Olander L., Jansson A., Olofsson U., "A pin-on-disc simulation of airborne wear particles from disc brakes", *Wear*. Vol. 268, pp. 763-769, (2010).
18. Hegadekatte V., Huber N., Kraft O., "Modeling and simulation of wear in a pin on disc tribometer", *Tribology Letters*, Vol. 24, pp. 51-60, (2006).
19. Torrance A.A., "Modelling abrasive wear", *Wear*, Vol. 258, pp. 281–293, (2005).
20. DIN 50 324; Testing of friction and wear.
21. ASTM G 99 - 95a; Standard test method for wear testing with a Pin-on-Disk apparatus.
22. Shigley J.E., Mischke C.R., "Mechanical Engineering Design", Fifth Edition, Chapter 2, McGraw-Hill, Inc, (1989).

۲۳. رفیعی م.، صالحی م.، شمعانیان م.، "توسعه و مشخصه یابی پوشش‌های نوین سرمتی B_4C-TiB_2-TiC-Ni تولید شده توسط فرایند پاشش شعله‌ای پرسرعت"، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، (۱۳۹۳).

۲٤. ضیایی م، پیغاله ا، راهنمای مدلسازی با نرم‌افزار Abaqus ، فروزش، (۱۳۹۰).

25. Claus Y., Wegst M.,"Key to Steel", (2013).
26. Dijkum C.D., Dorien D.T., Etzel V.K., "Validation of simulation models", SISWO publication 403, Amsterdam, SISWO, (1999).
27. Sargent R.G., "Verification and validation of simulation models", Syracuse University, Department of Electrical Engineering and Computer Science, L. C. Smith College of Engineering and Computer Science, Syracuse, NY 13244, U.S.A., (2011).
28. Pace D.K., "Modeling and Simulation Verification and Validation Challenges", Johns Hopkins APL technical digest, Vol. 25, (2004).
29. Chowdhury M.A., Khalil M.K., Nuruzzaman D.M. , Rahaman M.L., "The effect of sliding speed and normal load on friction and wear property of aluminum", *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, Vol. pp. 1145-49, (2011).
30. Ameen Hassan H.A., Mubarak K.S.M., "Effect of loads, sliding speeds and times on the wear rate for different materials", *American Journal of Scientific and Industrial Research*, Vol. 2, pp. 99-106, (2011).
31. Bhushan B., "Introduction to tribology", Second edition, John Wiley & Sons, US, (2013).
32. Gultekin D., Uysal M., Aslan S., Alaf M., Guler M.O., Akbulut H., "The effects of applied load on the coefficient of friction in Cu-MMC brake pad/Al-SiCp MMC brake disc system", *Wear*, Vol. 270 pp. 73-82, (2010).
33. Tyagi R., Xionga D., Li J., "Effect of load and sliding speed on friction and wear behavior of silver/h-BN containing Ni-base P/M composites", *Wear*, Vol. 270, pp. 423-430, (2011).